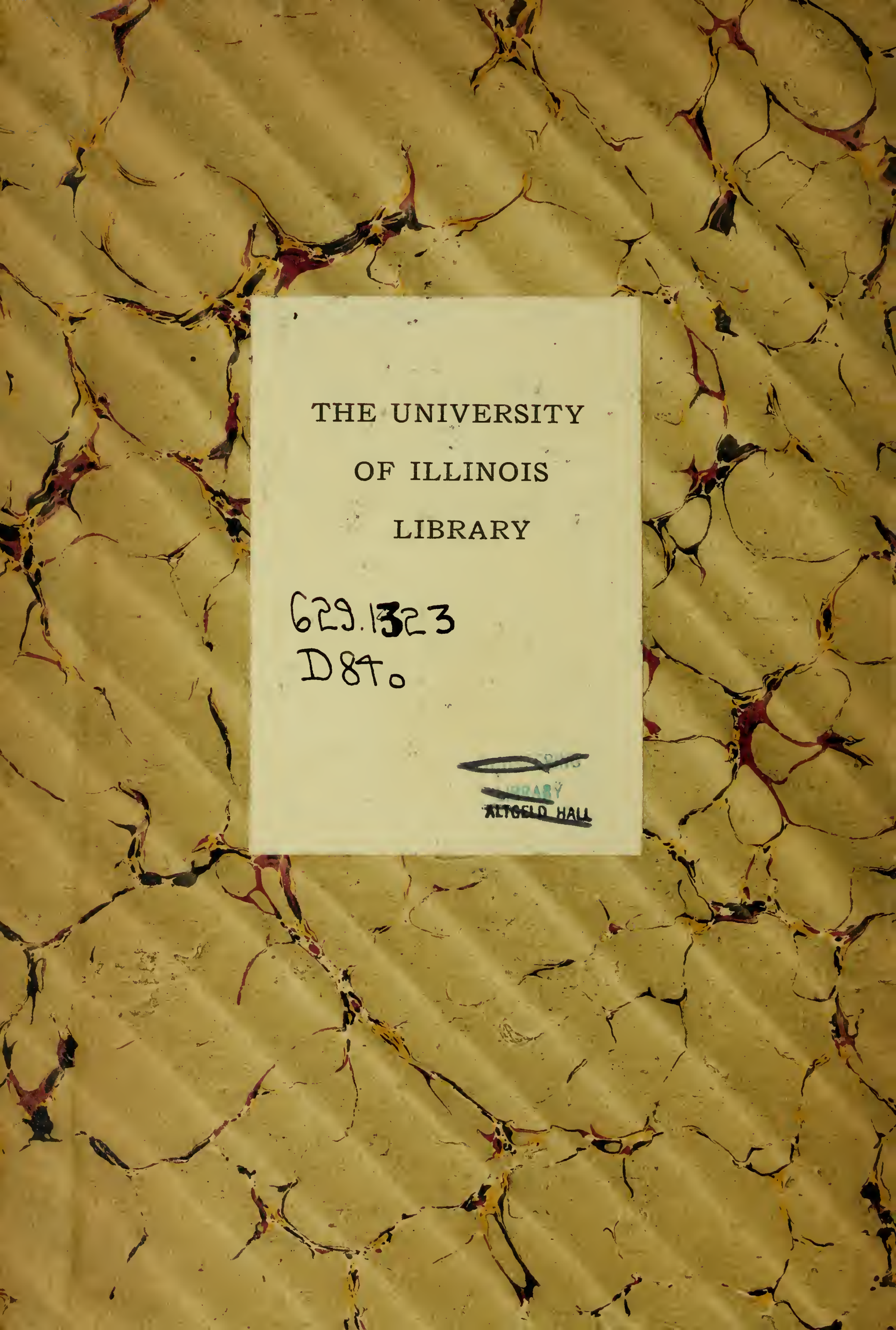
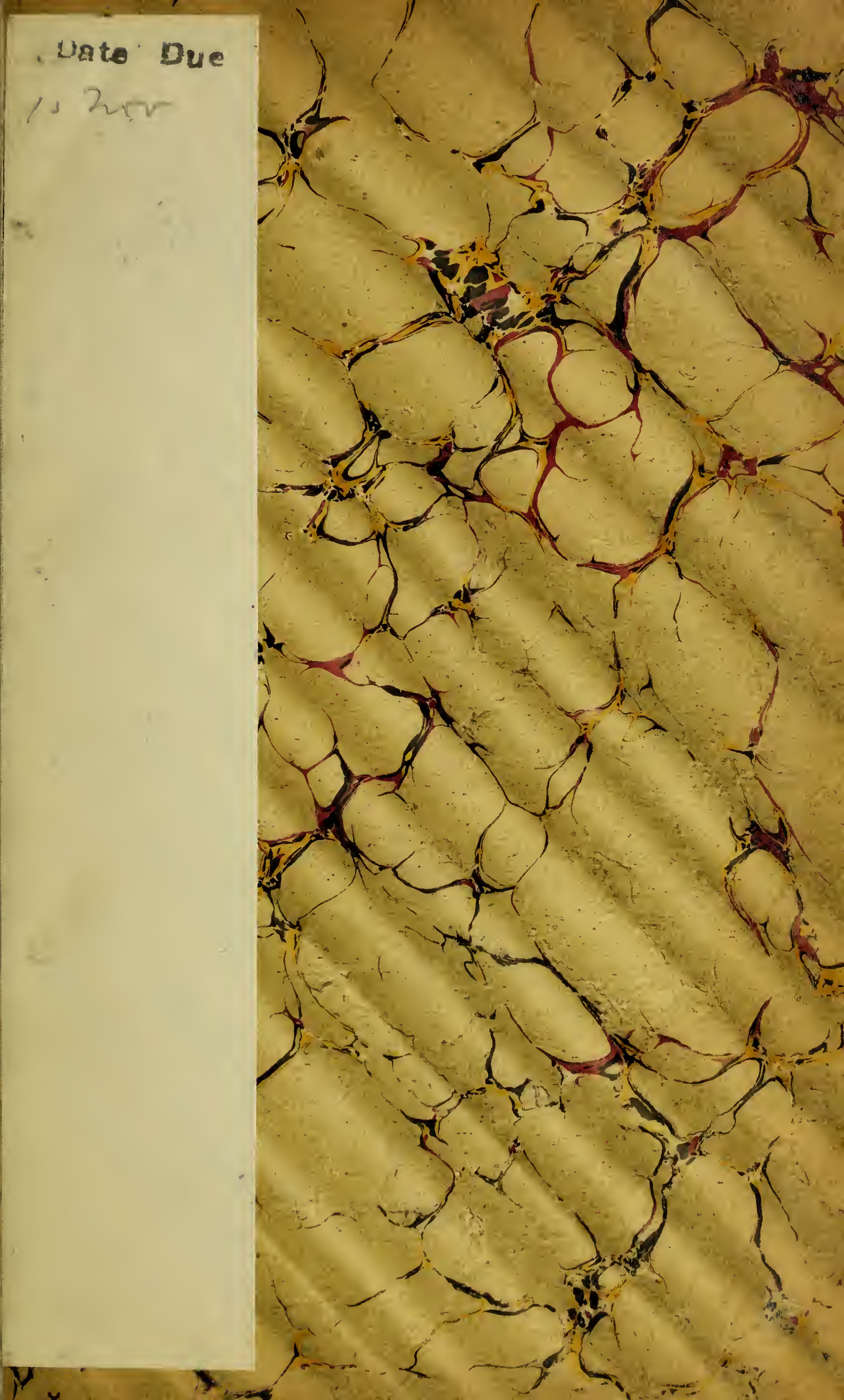



THE UNIVERSITY
OF ILLINOIS
LIBRARY
629.1323
D84o
LIBRARY
ALTGELD HALL


Date Due

LES OISEAUX

CONSIDÉRÉS COMME

DES

AÉROPLANES ANIMÉS

ESSAI

D'UNE NOUVELLE THÉORIE DU VOL

PAR

S. DRZEWIECKI

CLERMONT (OISE)
IMPRIMERIE DAIX FRÈRES
3, PLACE SAINT-ANDRÉ, 3

—

1889





LES OISEAUX

CONSIDÉRÉS COMME

DES

AÉROPLANES ANIMÉS

ESSAI D'UNE NOUVELLE THEORIE DU VOL

Nous nous sommes proposés dans ce travail de présenter une explication rationnelle du vol des oiseaux, en cherchant à leur appliquer les lois mécaniques qui régissent le mouvement des aéroplanes, c'est-à-dire de surfaces planes se mouvant dans l'air et faisant, avec la direction du mouvement, un angle déterminé.

Nous allons commencer par démontrer l'insuffisance des théories de la locomotion aérienne, admises jusqu'ici, en exposant les résultats auxquels nous amène leur discussion mécanique. Nous reconnaîtrons ensuite que le vol n'a lieu qu'à la condition absolue de l'avancement horizontal du volateur, et qu'en tenant compte de cet avancement la théorie de l'appui normal (*orthoptère*) revient à celle de l'aéroplane, c'est-à-dire celle qui trouve la sustention dans la résistance de l'air attaqué sous une faible incidence. Ceci nous mènera

naturellement à l'étude de l'aéroplane. Nous déterminerons les relations qui relient les surfaces des aéroplanes, les poids supportés, les angles d'incidence, le travail nécessaire à la propulsion, le tout en fonction de la vitesse, ainsi que les conditions de rendement maximum du propulseur, par rapport au poids supporté. Puis nous démontrerons de quelle façon les volateurs animés peuvent être assimilés aux aéroplanes et dans quelle mesure on peut appliquer aux premiers les lois établies pour les seconds. Enfin nous montrerons que toutes les observations faites sur le vol et les évolutions des volateurs naturels, si compliquées qu'elles puissent paraître, trouvent une explication simple et scientifique si on considère les oiseaux comme des aéroplanes animés.

Parmi les diverses hypothèses plus ou moins scientifiques, proposées pour l'explication du vol, nous retrouvons une idée dominante, à savoir : que l'aile de l'oiseau, frappant l'air de haut en bas, y trouverait un appui suffisant pour supporter le poids du volateur ; la translation de l'oiseau serait due à l'inclinaison du plan de l'aile et serait indépendante de la sustention. Tel est le thème général qui constitue le fond des théories les plus scientifiques. Les observations du mouvement de l'aile de l'oiseau, confirmées par les expériences si ingénieuses du savant professeur Marey, qui déterminent exactement, au moyen d'appareils enregistreurs, les positions consécutives de l'aile aux différentes phases du battement, sembleraient donner raison à la théorie « *orthoptère* ». D'un autre côté, si on cherche à calculer le poids que pourrait supporter l'aile d'un oiseau, dont la surface et le nombre des battements sont connus, on s'aperçoit que le chiffre obtenu, en se basant sur la théorie de l'appui normal, est tellement inférieur au poids du volateur, que la sustention devient absolument impossible.

Pour le démontrer, nous allons nous servir de la formule empirique, établie par le colonel Duchemin, basée sur les ré-

sultats d'un grand nombre d'expériences. Cette formule détermine la résistance éprouvée par un plan qui se meut normalement à sa surface, dans l'air en repos, en tournant autour d'un axe fixe situé dans ce plan (1).

Si on appelle :

R la résistance normale appliquée au centre de pression,
S l'étendue de la surface,
Δ la masse de l'unité de volume du fluide.
V la vitesse tangentielle du centre de pression du plan,
L la distance du centre de pression à l'axe de rotation, on a

$$R = 0{,}627\ S.\ \Delta.\ V^2 \left(1 + \frac{0{,}8122\ \sqrt{S}}{0{,}627 \times L}\right)$$

Prenons maintenant un oiseau du type buse par exemple ; la surface de chaque aile étant $S = 0{,}1^{mq}$ environ, prenons comme distance du centre de pression à l'articulation de l'aile une valeur $L = 0{,}20^{m}$. Supposons que l'aile s'abaisse en *0,2* de seconde (chiffre établi par l'observation directe) ; admettons en outre que l'amplitude de l'oscillation de l'aile soit de *120°* (elle est beaucoup moindre en réalité) : le centre de pression aura donc une vitesse tangentielle:

$$V = \frac{2\pi \times 0{,}2 \times 20}{360 \times 0{,}2} = 2{,}07^{m.} \qquad \textit{soit 2 mètres environ.}$$

La masse de l'unité de volume de l'air étant *850* fois moindre que celle de l'eau, nous aurons :

$$\Delta = \frac{1000}{9{,}81 \times 850} = 0{,}2\ \ kgr.$$

Introduisant ces chiffres dans la formule et effectuant, nous obtenons :

$$R = 92\ grammes,$$

ce qui, pour les deux ailes, donnerait une sustention de *184* grammes pour supporter un oiseau, dont le poids est environ *10 fois* plus considérable. Cet oiseau, dans les conditions admises et qui se trouvent réalisées dans la nature, serait

(1) Recherches expérimentales sur les lois de la résistance des fluides, par M. le Colonel Duchemin. — Mémorial d'Artillerie, N° V, page 275.

donc dans l'impossibilité de se soutenir dans l'air, et cependant il vole.

Si maintenant nous cherchons à augmenter le nombre des battements de l'aile, jusqu'à ce que la résistance sur l'air devienne égale au poids de l'oiseau et que nous multiplions la vitesse ainsi obtenue par la résistance éprouvée (soit le poids de l'oiseau), nous arrivons à un travail dépensé tellement énorme, que nous cesserons de nous étonner des résultats obtenus par Borelli et Navier, amenés par leur calcul à évaluer à *1/17 de cheval-vapeur* le travail dépensé par une hirondelle pendant le vol et à assigner aux muscles de l'oiseau un effort dépassant dix mille fois le poids de l'animal.

L'observation journalière nous fournit aussi toute une série d'arguments à opposer à la théorie de l'appui normal. Si cette théorie était exacte et que l'aile prît réellement son appui normalement à sa surface, comme le ferait une rame dans l'eau, nous verrions les oiseaux s'élever de terre verticalement, l'axe de leur corps restant horizontal ; or, l'expérience de tous les jours nous montre que les oiseaux ne peuvent s'élever que progressivement, suivant un plan incliné, en avançant dans la direction de l'axe de leur corps. De même on n'a jamais vu un oiseau voler à reculons, ce qui, d'après la théorie orthoptère, devrait lui être tout aussi facile que de voler en avant.

Cette théorie ne nous rend pas compte non plus de la nécessité de la vitesse d'avancement, qu'elle considère comme un élément tout à fait indépendant de la sustention et cependant chacun peut constater qu'un oiseau, pour s'élever, doit acquérir, au départ, par le saut ou la course, une impulsion horizontale suffisamment rapide, faute de laquelle l'enlèvement devient impossible. Ces faits sont trop connus pour que nous ayons besoin de nous y arrêter longuement ; citons, en passant, quelques exemples souvent rappelés. L'angle maximum, sous lequel un grand oiseau peut s'élever de terre, est de 45° environ, aussi peut on tenir captif un aigle ou un corbeau par exemple, dans un espace non couvert, à la condition que les parois verticales de l'enceinte soient aussi élevées que son aire ; pour la même raison une hirondelle peut être tenue captive dans une boîte cubique sans couvercle. C'est sur ce même principe qu'est basée la chasse au Condor

dans l'Amérique du Sud ; la proie qui doit attirer le rapace est attachée au milieu d'une enceinte entourée d'une petite haie de broussailles ; quand l'oiseau, une fois posé à terre, veut reprendre son vol en cherchant son élan dans la course, la haie, qui arrête son essor de toutes parts, ne lui permet pas d'acquérir une vitesse suffisante pour quitter sa prison. Dans le midi de la Russie, on chasse l'outarde en la poursuivant à cheval, lorsque le verglas couvre la terre ; alors ces oiseaux, ne pouvant courir sans glisser sur le sol, se trouvent dans l'impossibilité d'acquérir la vitesse nécessaire pour s'élever de terre. Mouillard, dans son intéressant livre l'*Empire de l'air*, cite un grand nombre de faits à l'appui de la thèse que nous soutenons et qu'il formule si bien : « *Pas de vitesse*, *pas de vol.* »

D'après la théorie que nous combattons, il n'y aurait pas de relation nécessaire entre la vitesse du vol et la surface relative (au poids) du volateur. Cependant nous verrons plus loin que cette relation existe et que la théorie aéroplane nous en fera comprendre la nécessité.

Ainsi, tandis que d'un côté les belles expériences de M. Marey nous indiquent positivement que les positions successives de l'aile concordent avec l'hypothèse de l'appui normal, d'un autre côté nous constatons l'impossibilité absolue d'admettre cette hypothèse. D'où provient donc ce désaccord ?

Simplement de ce que les observateurs, qui ont étudié le mouvement de l'aile, ont rapporté ce mouvement au corps de l'oiseau immobile. Ils ont obtenu, en effet, les lieux géométriques des différentes parties de l'aile, toujours par rapport à l'oiseau, mais en réalité pendant que l'aile a effectué un battement, le corps de l'oiseau s'est lui-même déplacé par rapport à l'air et les vitesses des différentes parties de l'aile, se composant avec la vitesse d'avancement, ont produit des résultantes, par conséquent des résistances, toutes différentes de celles considérées lorsque l'on ne tient pas compte du mouvement propre de l'oiseau. La vitesse de translation de l'oiseau étant de beaucoup supérieure à la vitesse tangentielle des différents points de l'aile pendant le battement, l'introduction, dans le calcul de ce facteur négligé, change considérablement les résultats.

Prenons l'exemple de l'oiseau cité plus haut. Nous avons

vu que la vitesse tangentielle V' du centre de pression C de son aile était d'environ 2 mètres. Sa vitesse V de translation étant d'au moins 20 mètres, la résultante V'' de ces deux vitesses sera la diagonale du rectangle de ces vitesses (*V est considéré comme horizontale et V' verticale*) ; c'est suivant cette diagonale V'' que le point C de l'aile rencontrera l'air en repos et c'est par conséquent suivant cette direction que le vent relatif à l'aile viendra frapper cette dernière. La résultante V'' fera avec l'horizontale un angle ω dont la tangente sera $\frac{V'}{V}$ c'est-à-dire $\frac{1}{10}$. L'angle ω sera donc de 6° environ (*Tg. 6° = 0,105*) (*Fig. I*).

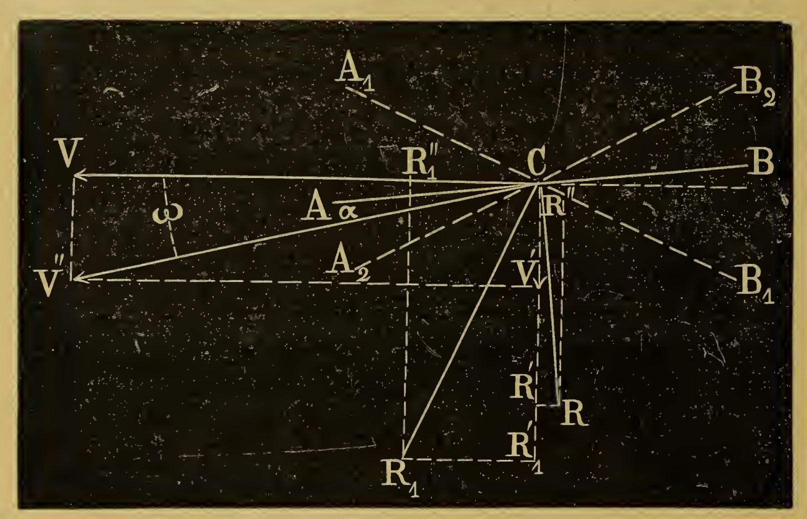


Figure 1.

Désignant par $A\ B$ la section de l'aile, au point C, par un plan vertical parallèle à l'axe de l'oiseau, il est facile de voir que cette ligne $A\ B$, pendant l'abaissement de l'aile, doit nécessairement occuper une position comprise dans l'angle ω. En effet, si elle occupait une position en dehors de cet angle, $A_1\ B_1$ par exemple, la composante horizontale R''_1 de la résistante R_1 normale à la surface de l'aile, étant opposée au sens du mouvement de translation au lieu de servir à la pro-

pulsion, ferait reculer l'oiseau ; de même si cette ligne occupait la position A_2 B_2, l'aile, rencontrant l'air suivant la direction V'', serait frappée par sa face supérieure, ce qui empêcherait également la sustention et l'avancement. On voit aussi que la position de l'aile ne doit coïncider ni avec la direction C V, ni avec C V'', car, dans le premier cas, la composante propulsive, suivant V, serait nulle (la résistance étant alors normale à cette direction), et dans le second, il n'y aurait aucune résistance éprouvée par l'aile, par conséquent pas de sustention, le plan de l'aile coïncidant avec la direction du mouvement absolu. L'aile est donc assujettie à occuper fatalement pendant son abaissement une position intermédiaire entre C V et C V'', par suite de quoi elle fait, avec la direction C V'' du vent relatif, un angle α moindre que ω et par conséquent très faible ; cet angle α doit être tel, que les conditions de sustention maxima soient réalisées pour le minimum de résistance à l'avancement. Plus loin nous déterminons cet angle pour ces conditions.



Figure 2.

En jetant un coup d'œil sur la figure 1, il est facile de voir que la sustention, dans le cas qui nous occupe, est due à la composante verticale R' de la résistance R éprouvée par le plan de l'aile, rencontrant l'air (le vent relatif) sous un angle très petit. Ces conditions ne sont autres que celles d'un aéroplane. C'est grâce à l'avancement que se produit la sustention.

En se reportant à la figure classique qui donne le lieu géométrique des différentes positions d'une section transversale de l'aile *(fig. 2)* que le savant professeur Marey a, pour ainsi dire, saisie sur le vif, au moyen de ses ingénieux appareils auto-enregistreurs, et que l'on rapporte ces différentes positions du plan de l'aile, au vent relatif réel, résultant du mouvement propre de l'aile et de celui de translation de l'oiseau

on voit que pendant l'abaissement de l'aile *(fig. 3)* de même que pendant son relèvement, *(fig. 4)* le plan de l'aile *A B*, dont l'arête antérieure s'abaisse dans le premier cas et se relève

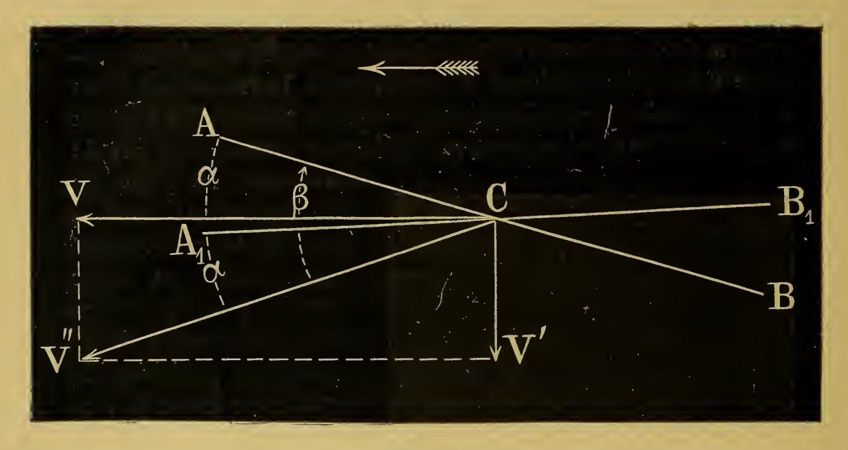


Figure 3.

dans le deuxième, rencontre toujours le vent relatif réel *V''* (résultante des vitesses : *V* horizontale de translation et *V'* verticale propre de l'aile) sous un angle α constant et relativement très petit. Ici encore on voit que la sustention est due à l'avancement.

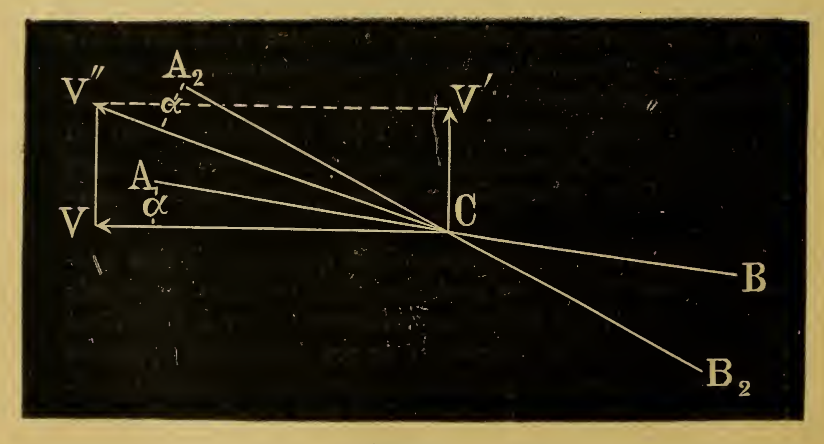


Figure 4.

La théorie orthoptère se trouve donc acculée à un dilemme : si l'on ne tient pas compte du mouvement de translation de l'oiseau, cette théorie nous mène à l'absurde, ainsi que nous l'avons démontré plus haut ; si au contraire on prend en considération cet avancement, l'orthoptère devient aéroplane.

Ces considérations nous amènent donc, tout naturellement, à l'étude des lois des aéroplanes.

Le colonel Duchemin (1) a déduit d'un grand nombre d'expériences que la résistance normale d'une surface plane, exposée obliquement au choc d'un fluide, s'exprime par la formule :

$$(I) \quad R = K\left(1 - \frac{Sin\ \alpha .\ Cos\ \alpha}{6,48} + \frac{Cos^2\ \alpha}{3,52}\right) \times \frac{2\ S.\ V^2.\ \Delta.\ Sin\ \alpha}{1 + Sin^2\ \alpha}$$

R représente la résistance normale à la surface.

α l'angle de la surface plane avec la direction du mouvement,

K un coefficient qui varie suivant que c'est le plan qui avance ou que c'est le liquide qui est en mouvement. Dans le cas de fluide en repos $K = 0,6270$ (pour un angle d'attaque de 90°) (2).

V la vitesse du mouvement.

S la surface du plan.

Δ la densité du fluide.

De plus, les expériences de Thibaut, Beaufoy, Duchemin et plus tard celles de Joëssel nous ont appris que ce coefficient K variait à peu près du simple au double quand α passe de 90° à 0°. C'est-à-dire que, dans les valeurs de α voisines de 0, ce coefficient atteint des valeurs presque doubles de celles qu'il

(1) Recherches expérimentales, etc., Col. Duchemin, p. 227.

(2) Ibid., p. 197.

aurait pour des valeurs voisines de *90°*. Cette condition est satisfaite si nous donnons au coefficient la forme :

$$K = 0{,}627 \frac{2}{2 - Cos\ \alpha} = \frac{1{,}254}{2 - Cos\ \alpha}$$

Cette expression du coefficient, fonction de l'angle, a été confirmée par un grand nombre de résultats d'expériences.

En outre, dans ses expériences sur la résistance de l'air, le colonel Duchemin a reconnu ce fait, observé déjà par d'autres expérimentateurs, que la résistance augmentait plus rapidement que le carré de la vitesse du mouvement; il a attribué cette augmentation à l'élasticité de l'air. Pour satisfaire à cette propriété de l'air, Duchemin exprime la densité Δ par (1) :

$$\Delta = \delta \left(1 + \frac{V}{\gamma}\right)$$

dans laquelle V est la vitesse du mouvement, δ la densité du fluide et γ la vitesse avec laquelle le fluide se précipiterait dans le vide (*pour l'air* $\gamma = 416\ m.$).

Le rapport de la densité de l'air à celle de l'eau, dans les conditions normales, étant $\frac{1}{850}$, l'expression deviendra :

$$\Delta = \frac{1000}{g \times 850}\left(1 + \frac{V}{416}\right) kilogr.$$

dans laquelle g exprime l'accélération due à la pesanteur $g = 9{,}81$. Si donc dans la formule (I) nous remplacons la valeur de K et de Δ par celles que nous venons de déterminer nous aurons :

$$R = \frac{1{,}254}{2 - Cos\ \alpha}\left(1 - \frac{Sin\ \alpha\ Cos\ \alpha}{6{,}48} + \frac{Cos^2\ \alpha}{3{,}52}\right) \times$$

$$\frac{2\ S.\ V^2.\ Sin\ \alpha}{1 + Sin^2} \times \frac{1000\ \left(1 + \frac{V}{416}\right)}{850 \times 9{,}81}$$

En effectuant et remplaçant $Sin\ \alpha\ Cos\ \alpha$, par $\frac{Sin 2\alpha}{2}$, nous obtenons l'expression :

$$R = 0{,}0000158332\ (45{,}619 + 12{,}96\ Cos^2\ \alpha - 3{,}52\ Sin 2\alpha)$$

$$\times \frac{Sin\ \alpha\ (416 + V)}{(1 + Sin^2\ \alpha)\ (2 - Cos\ \alpha)}\ V^2.\ S.$$

(1) Ibid., p. 269.

dans laquelle la résistance R, est exprimée en kilogrammes, la vitesse V en mètres à la seconde, la surface S en mètres carrés.

C'est l'expression de la résistance normale qu'éprouverait un plan de S mètres carrés, se mouvant dans l'air avec une vitesse V et faisant, avec la direction du mouvement, un angle α. Cette résistance normale peut se décomposer en deux autres forces, l'une verticale, de direction opposée à celle de la pesanteur (force de sustention), l'autre horizontale, opposée à la direction du mouvement (résistance à l'avancement) la première de ces deux forces $R' = R \, Cos \, \alpha$, la seconde $R'' = R \, Sin \, \alpha = R' \, Tg \, \alpha$.

Si la composante de sustention R' devient égale au poids P du plan S, le mouvement s'effectuera suivant l'horizontale ; par conséquent, afin d'obtenir le mouvement horizontal du système, il faut égaler P à R', soit $P = R \, Cos \, \alpha$.

Remplaçant dans cette équation R par sa valeur tirée de l'équation (I), on a :

$$P = 0{,}0000158332 \, (45{,}619 + 12{,}96 \, Cos^2 \alpha - 3{,}52 \, Sin \, 2 \alpha) \times \frac{Sin \, \alpha . \, Cos \, \alpha \, (416 + V)}{(1 + Sin^2 \alpha) \, (2 - Cos \, \alpha)} \, V^2 . S.$$

ou plus simplement :

$$\text{(II)} \quad P = 0{,}0000079166 \, (45{,}619 + 12{,}96 \, Cos^2 \alpha - 3{,}52 \, Sin \, 2 \alpha) \times \frac{Sin \, 2 \alpha \, (416 + V)}{(1 + Sin^2 \alpha) \, (2 - Cos \, \alpha)} \, V^2 . S$$

Cette équation nous détermine le nombre de kg. que peut soutenir en l'air une surface plane de S mètres carrés, se mouvant horizontalement avec une vitesse V et faisant avec l'horizon un angle α.

Au moyen de cette formule, nous avons dressé le tableau (A) dans lequel se trouvent calculées les différentes forces de sustention d'une surface plane d'un mètre carré, incliné sur l'horizon d'angles α, variant de *20'* à *10°* et se mouvant horizontalement avec les vitesses de *5*, *10*, *15*, *20*, *25* et *30* mètres.

Tableau A.

POIDS P SUPPORTÉS PAR UN MÈTRE CARRÉ.

(En Kilogrammes).

α	V = 5	V = 10	V = 15	V = 20	V = 25	V = 30
20'	0,05675	0,22969	0,52340	0,94032	1,48600	2,16425
40'	0,11339	0,45905	0,82987	1,87887	2,96942	4,32443
1°	0,17001	0,68814	1,56648	2,81713	4,45215	6,48494
1°30'	0,25435	1,02947	2,34350	4,21453	6,66007	9,70019
2°	0,33834	1,36944	3,11740	5,60634	8,86037	12,9036
2°30'	0,42179	1,70720	3,88629	6,98910	11,0457	16,0861
3°	0,50461	2,04242	4,64937	8,36143	13,2145	19,2447
4°	0,66800	2,70374	6,15482	11,0688	17,4934	25,4760
5°	0,82784	3,35146	7,62753	13,7174	21,6792	31,5720
6°	0,98365	3,98135	9,06320	16,6790	25,7597	37,5145
7°	1,13434	4,59125	10,4516	18,7961	29,7057	43,2622
8°	1,27971	5,17965	11,7910	21,2050	33,5127	48,8054
9°	1,41949	5,74538	13,0790	23,5210	37,1730	54,1360
10°	1,55282	6,28514	14,3074	25,7303	40,6641	59,2210

En portant sur l'axe des X les différentes valeurs de α, exprimées en degrés, d'après le tableau précédent, et sur l'axe des Y les différentes valeurs de P, empruntées au même tableau, pour une même vitesse, on obtient les lignes (*Fig. 5*).

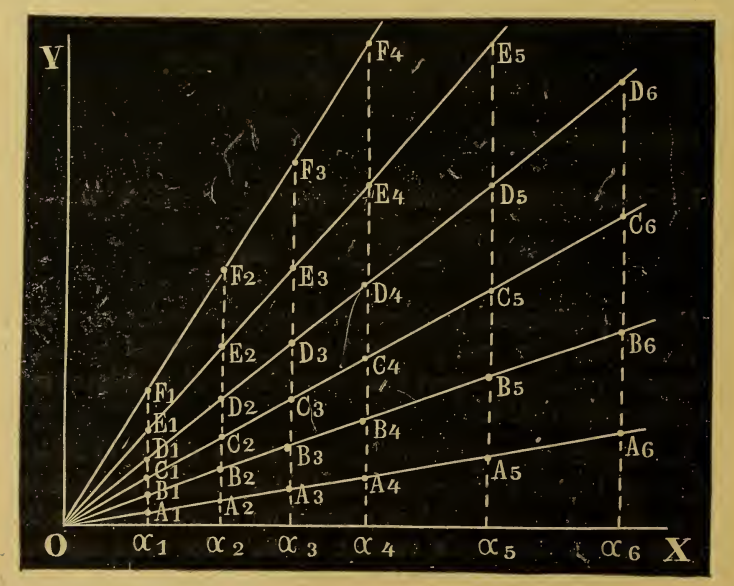


Figure 5.

$A_1 \ A_2 \ A_3 \dots\dots$
$B_1 \ B_2 \ B_3 \dots\dots$
$C_1 \ C_2 \ C_3 \dots\dots$

qui se rapprochent très sensiblement de lignes droites ; nous pouvons donc admettre, dans les limites d'angles considérées, la proportionnalité directe de la force de sustention à l'angle d'attaque, exprimée en degrés.

Ceci nous permet de simplifier la formule qui devient :

$$P = 0{,}000016153\ (416 + V)\ V^2 .\ S .\ \alpha$$

le coefficient a été obtenu en faisant dans l'équation précédente : $\alpha = 1$, ce qui pour $S = 1\ m.\ c.$ devient :

(III) $$P = 0{,}000016153\ (416 + V)\ V^2 .\ \alpha.$$

Dans nos calculs ultérieurs nous nous servirons de cette formule simple, d'une approximation suffisante dans la limite des petits angles, sauf à vérifier les résultats par la formule (II).

Pour les angles plus grands nous arriverions à une approximation beaucoup plus grande en donnant à la formule (III) la forme :

$$P = 0{,}000217486\ (416 + V)\ V^2 .\ Sin\ (4{,}25\ \alpha)$$

En effet, nous voyons que P est maximum pour :

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \times \frac{1}{4{,}25}$$

ce qui correspondrait à un angle d'environ $22°$,tandis que par la formule (II) nous arriverons aussi à un maximum pour une valeur de α voisine de $27°$. — Cet intéressant résultat du maximum s'accorde avec le fait observé dans les gouvernails de bateau, qui donnent le maximum d'effet quand ils font, avec la direction de la quille, un angle d'environ $30°$; on n'arriverait à ce maximum ni par la loi du Sinus simple ni par celle du Sinus carré (*Loi de Newton*).

Nous allons déterminer maintenant le travail nécessaire pour imprimer dans l'air, à notre surface S, inclinée de $\alpha°$ sur l'horizon, une vitesse V. Ce travail sera évidemment le produit de la vitesse V par la résistance opposée au mouvement. Cette résistance se compose de trois résistances :

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 .$$

ρ_1 est la composante horizontale de R exprimée déjà plus haut, $\rho_1 = R'' = P.\ S.\ Tg\alpha$, c'est la résistance à l'avancement.

ρ_2 est la résistance qui dépend de la section transversale maxima du système considéré (maître couple de la nacelle de l'aéroplane ou du corps de l'oiseau) qu'on peut assimiler à la coque d'un bateau. Pour la déterminer nous nous servirons de la formule employée, dans le cas analogue, dans la Marine :

$$\rho_2 = s \frac{V^2}{2g} K.\ \delta$$

dans laquelle s est la section du maître couple, K un coefficient fonction de la forme de système volant, g l'intensité de la pesanteur, δ le poids du mètre cube d'air :

$$\delta = \frac{1000}{850} \textit{ kilogr.}$$

Si on donne à K une valeur de 0.05, déterminée pour des bateaux de bonne construction, on a :

$$\rho_2 = \frac{s.\ V^2.\ 0{,}05.1000}{2.9{,}81.850}$$

Dans les conditions que nous aurons à examiner, nous ferons : $s = \frac{1}{100}$, ce qui suffit pour la construction d'aéroplanes. Chez les oiseaux ce rapport est un peu différent.)

Remplaçant s par sa valeur et effectuant nous avons :

$$\rho_2 = 0{,}00003\ S.\ V^2 \textit{ kilogr.}$$

Le troisième élément ρ_3 est fonction de frottement de l'air sur la surface S : il dépend évidemment de la qualité de la surface, de la vitesse du mouvement et de la densité du fluide. Nous nous servirons, pour cette détermination, de la formule établie par Froude (1), en admettant que le coefficient de frottement dans l'air est le même que dans l'eau (il est à supposer qu'il est moindre dans l'air) et qu'en outre le frottement, sur une étoffe de percale, est le même que sur une étoffe de soie ou sur une surface de plumes. Les expérien-

(1) Brith. Assoc., 1872 et 1874.

ces de Froude, faites sur des surfaces de percale, ont donné :

$$\rho_3 = 0{,}1\, S\, (V^2 + 0{,}25\ V)\, \delta \text{ kilogr.}$$

ce qui, pour l'air, fera :

$$\rho_3 = (0{,}000118\ V^2 + 0{,}0000295\ V)\, S$$

En ajoutant ρ_1, ρ_2 et ρ_3 nous obtenons :

$$\rho = P.\, Tg\alpha.\, S + 0{,}00003\, S.\, V^2 + (0{,}000118\ V^2 + 0{,}0000295\ V)\ S$$

pour $S = 1$ *m. c.* il vient :

$$\rho = P.\ Tg\ \alpha. + 0{,}000148\ V^2 + 0{,}0000295\ V.$$

Pour en déduire le travail T, il suffit de multiplier par V, On obtiendra le travail à l'avancement :

$$\text{(IV)} \qquad T = (P.\ Tg\,\alpha + 0{,}000148\ V^2 + 0{,}0000295\ V)\ V$$

Cette formule nous donne en kilogrammètres le travail nécessaire pour imprimer horizontalement à une surface d'un mètre carré, une vitesse V sous un angle α, ce qui lui donnera, comme nous l'avons vu, une force de sustention de P kilogrammes.

Au moyen de la formule (IV), nous avons dressé un tableau (*tableau B*), dans lequel est déterminé le travail nécessaire pour imprimer, à une surface de *1* mètre carré, des vitesses d'avancement variant de 5 à *30* mètres, sous des angles d'incidence augmentant de *20'* à *10°*, comme pour le tableau *A*.

Tableau B.

TRAVAIL T NÉCESSAIRE A PROPULSER UN MÈTRE CARRÉ.

(*En Kilogrammètres*).

α	V = 5	V = 10	V = 15	V = 20	V = 25	V = 30
20'	0,020888	0,164312	0,551767	1,30521	2,54703	4.4003
40'	0,025834	0,204365	0,688553	1,63305	3,1947	5,5321
1°	0,034075	0,27106	0,916279	2,17880	4,2738	7,4178
1°30'	0,052539	0,42053	1,42663	3,40302	6,7514	11,6428
2°	0,078277	0,62917	2,139067	5,11156	10,0664	17,5406
2°30'	0,11316	0,89633	3,051322	7,29880	14,3875	25,0926
3°	0,151466	1,22125	4,161082	9,95980	19,6445	34,2797
4°	0.252798	2,04159	6,96927	16,6759	32,9124	57,4662
5°	0,381370	3,08312	10,51597	25,1982	49,7479	86,8881
6°	0,536172	4,33552	14,7948	36,2564	70,0169	122,3103
7°	0,715632	5,78830	19,7555	47,3532	93,5159	163,3806
8°	0,918497	7,43047	25,3689	60,7990	120,0784	209,7972
9°	1,143357	9,25074	31,5773	75,7028	149,5214	261,2484
10°	1,388257	11,23315	37,8427	91,9354	181,5877	317,2884

**

Nous voyons donc que les deux équations (III) et (IV) suffisent pour déterminer tous les éléments de la question.

Si, dans la formule (III), nous donnons à P une valeur déterminée constante et qu'en même temps nous attribuions à V successivement différentes valeurs, nous pourrons, pour chacune d'elles, déterminer la valeur de α qui sera numériquement exprimée en degrés et fraction de degrés. Substituant dans l'équation (IV) à α les valeurs ainsi obtenues, donnant à V les valeurs correspondantes prises pour la détermination des α par la formule (III) et prenant pour P la valeur constante admise pour cette détermination, nous obtiendrons, au moyen de l'équation (IV), pour T, une série de valeurs numériques que nous pourrons figurer par les ordonnées d'une courbe $A_1\ B_1\ C_1\ D_1 \ldots$, dont les abscisses représenteront les valeurs corespondantes de V. (*Pl. I*) fig. 6). Nous voyons que cette courbe a un minimum M. Si nous construisons de la même façon les courbes de T, en attribuant successivement à P des valeurs de 2, 3, 4, kilogrammes, nous obtiendrons, au moyen des équations (III) et (IV), comme précédemment, une série de courbes semblables :

$$A_2\ B_2\ C_2\ D_2 \ldots\ldots$$
$$A_3\ B_3\ C_3\ D_3 \ldots\ldots$$
$$A_4\ B_4\ C_4\ D_4 \ldots\ldots$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

toutes asymptotiques aux Y d'un côté et de l'autre à une courbe enveloppe, exprimée par l'équation de T, dans laquelle on aurait fait : $\alpha = O$. Toutes ces courbes ont un minimum M. Si, pour chacune d'elles, on recherche, par interpolation, la valeur de α qui correspond au minimum de T, on arrive à cet intéressant résultat, que, pour toutes les courbes, ce minimum a lieu pour une seule et même valeur de α.

$$\alpha = 1^\circ\ 50'\ 45''$$

On peut arriver au même résultat par la détermination directe de la valeur de α correspondant au travail minimum.

Pour la facilité de calcul, remplaçant par des lettres les coefficients numériques dans les formules (III) et (IV), nous aurons :

$$T = P.V.Tg\,\alpha + a.\,V^3 + b.\,V^2$$
$$P = c\ (V + K)\ V^2.\ \alpha$$

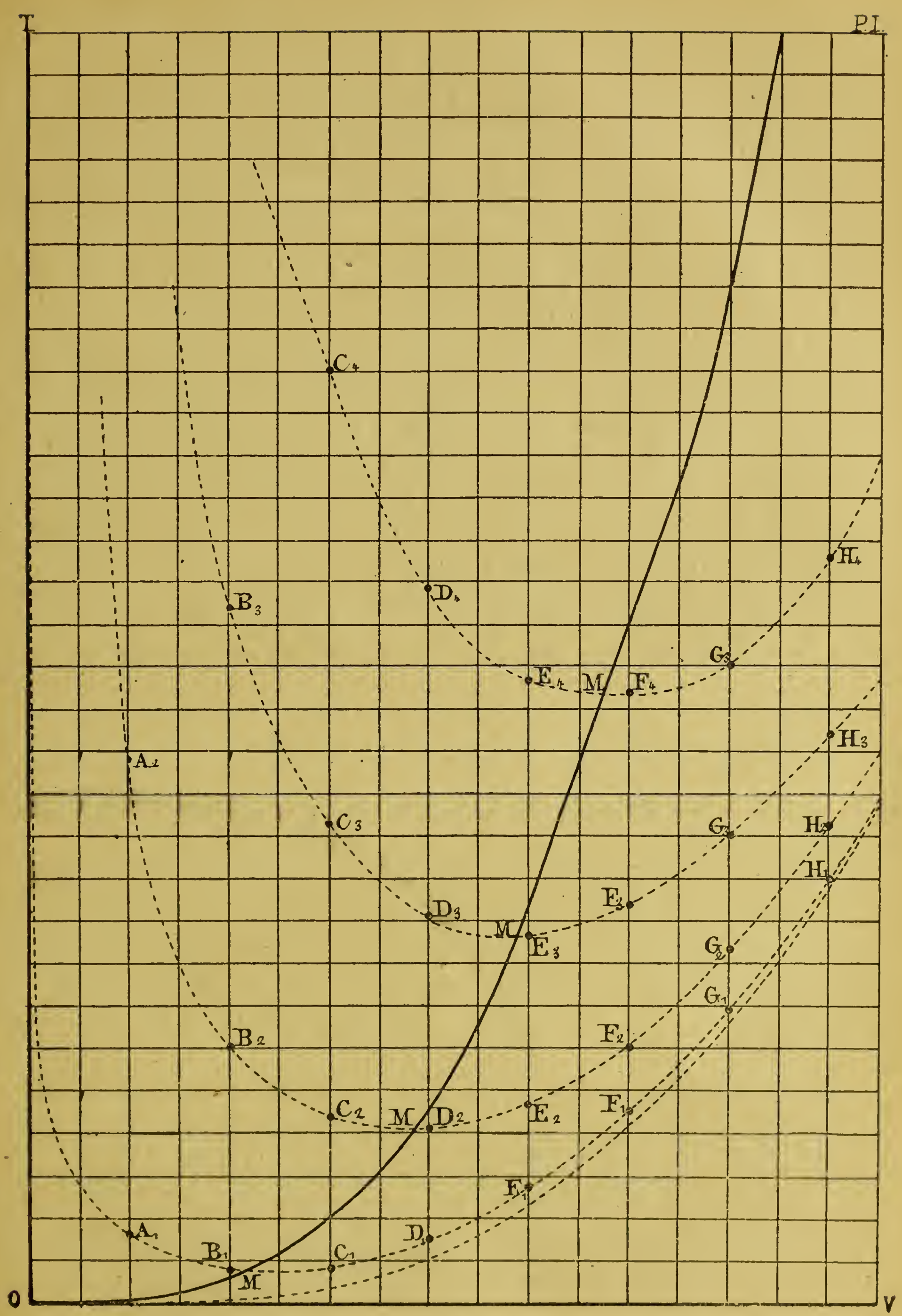

T
Pl.
O
V
C4
D4
E4
M
F4
G3
H4
B3
A2
H3
C3
G2
H2
H1
D3
E3
M
E3
G2
G1
B2
F2
C2
M
D2
E2
F1
E1
A1
D1
B1
C1
M

Figure 6.

Divisant la première de ces deux équations par la seconde, on obtient :

$$\frac{T}{P} = V.Tg.\alpha + \frac{aV + b}{c(V+K)\alpha}$$

Cherchons la valeur de α qui rendra minimun $\frac{T}{P}$ pour une vitesse déterminée de V, car il est évident que cette valeur d'α donnera le minimum de travail dépensé pour le maximum de sustention. Prenons la différentielle de $\frac{T}{P}$ par rapport à α, divisons par $d\alpha$, égalons à 0 cette dérivée et tirons en la valeur de α, nous aurons :

$$\alpha^2 = Cos^2\alpha \, \frac{aV + b}{c(V+K)V}$$

ou bien :

$$\alpha = Cos\,\alpha \sqrt{\frac{a}{c(V+K)} + \frac{b}{c(V+K)V}}$$

Ceci nous détermine l'angle α en fonction de la vitesse considérée V; mais, en examinant la valeur des coefficients qui entrent dans cette équation, nous voyons que l'influence de V sur la valeur d'α est presque nulle ; car nous prenons les vitesses V dans les limites de *1* à *30* mètres, et, le coefficient K étant de *416* mètres, le rapport $\frac{a}{(V+K)c}$ différera très peu du rapport $\frac{a}{Kc}$ car la valeur de Vc est négligeable vis à vis de Kc, à fortiori aussi les racines carrées de ces rapports différeront-elles très peu. Quant au coefficient $\frac{b}{cV(V+K)}$, cette expression n'affectera que d'une façon très faible la valeur de α, le coefficient b étant très petit relativement à K et V. On peut donc dire sans erreur sensible que, jusqu'à *30* mètres de vitesse environ, le minimum de travail a lieu pour un angle constant c'est-à-dire indépendant de la vitesse. La valeur $\alpha = 1^\circ\,50'\,45''$ dépend des coefficients choisis ; si ces coefficients étaient différents, nous aurions des valeurs d'α un peu différentes, mais le fait de la constance de l'angle n'en resterait pas moins établi.

Pour la détermination d'α nous nous sommes servis de la

formule approximative (III), en vérifiant cette valeur, par interpolation, dans (II), nous arrivons exactement au même résultat.

Remplaçant α, par sa valeur ainsi trouvée, correspondant au minimum de T, dans les formules (II)et (IV) nous obtenons :

(V).. $$P = 0{,}000029816\ V^3 + 0{,}01240345\ V^2$$

(VI).. $$T = 0{,}00000096088\ V^4 + 0{,}000547726\ V^3 + 0{,}0000295\ V^2$$

qui nous donnent, en fonction de V uniquement, 1° la force de sustention d'une surface d'un mètre carré, se mouvant horizontalement dans l'air avec une vitesse V sous un angle d'incidence de *1° 50' 45''*, et 2° le travail T correspondant. En divisant T par P, nous obtiendrons le travail nécessaire pour imprimer à une surface pesant *1* kilog., la vitesse V dans les mêmes conditions ; nous obtenons aussi une fonction de V que nous appellerons :

(VII) $$t = \frac{T}{P} = 0{,}03233973\ V + 4{,}963781457 - \frac{2058{,}9331}{V + 416}$$

De même, en appelant S la surface nécessaire pour porter *1* kil., nous avons :

(VIII) $$S = \frac{1}{P} = \frac{1}{0{,}000029816\ V^3 + 0{,}01240345\ V^2}$$

Ces quatre équations (V), (VI), (VII), (VIII), déterminent tous les éléments de l'aéroplane. Elles nous donnent d'abord le travail et le poids portés par mètre carré de surface et ensuite le travail et la surface par kilogr. à porter. Au moyen de ces quatre équations nous avons calculé le tableau ci-contre (*Tableau C*), en prenant des vitesses croissantes de *1* à *40* m.

Nous avons aussi construit les courbes correspondantes à ces quatre tableaux, en prenant les vitesses comme abscisses et comme ordonnées les valeurs tirées des tableaux pour T, P, t, S, (*Pl. II*) (*fig. 7*). Si, sur ce graphique, nous traçons une ordonnée, correspondant à une vitesse déterminée, elle coupera les quatre courbes en des points, qui nous donneront immédiatement les valeurs des quatre éléments correspondant à la vitesse choisie. En examinant la planche II, on voit que la courbe correspondant à T est une ligne *presque*

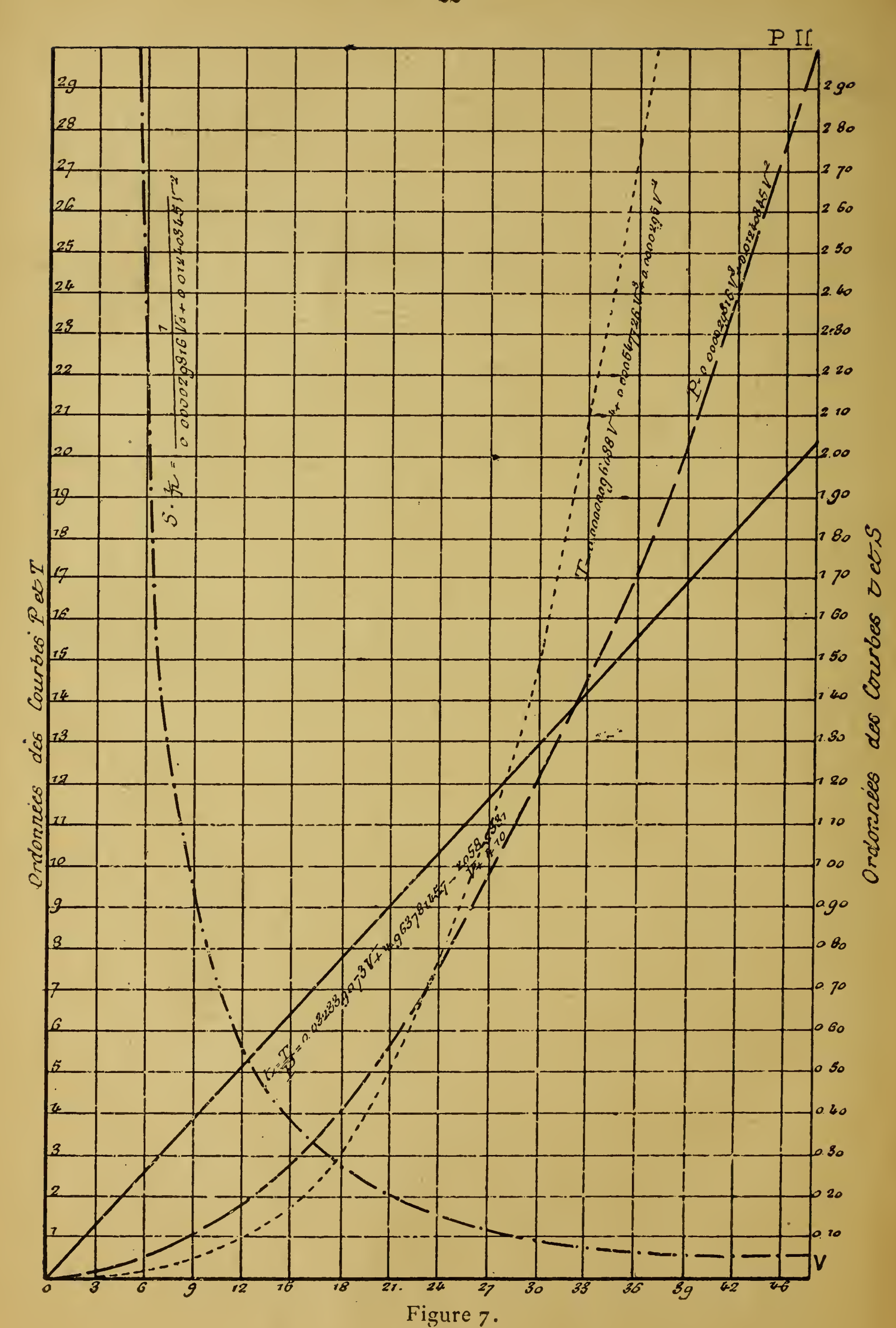

P II.
Ordonnées des Courbes P et T
Ordonnées des Courbes v et S
V
0
3
6
9
12
18
21.
24
27
30
33
36
39
42

Figure 7.

Tableau C.

V	P	T	$t = \frac{T}{P}$	$S = \frac{1}{P}$
1	0,012381	0,000576	0,044295	80,769055
2	0,049643	0,004500	0,088531	20,143827
4	0,199522	0,035658	0,176832	5,011978
6	0,451061	0,120194	0,264909	2,216995
8	0,805687	0,285255	0,352766	1,241176
10	1,264824	0,558385	0,440405	0,790624
12	1,829897	0,967221	0,527830	0,546479
14	2,502332	1,541834	0,615042	0,399627
15	2,879255	1,897128	0,658571	0,347312
16	3,283553	2,305824	0,702047	0,304548
17	3,715404	2,769916	0,745472	0,269150
18	4,174986	3,293058	0,788845	0,239522
19	4,662477	3,878924	0,832168	0,214478
20	5,178056	4,531216	0,875441	0,193160
21	5,721900	5,253655	0,918664	0,174767
22	6,294188	6,049987	0,961836	0,158877
23	6,895097	6,923980	1,004960	0,145031
24	7,524806	7,879425	1,048034	0,132894
25	8,183494	8,920137	1,091060	0,122197
26	8,871337	10,050052	1,134038	0,112723
27	9,588515	11,272731	1,176967	0,104292
28	10,335205	12,592356	1,219851	0,096757
29	11,111586	14,012734	1,262684	0,089994
30	11,917836	15,537796	1,305470	0,083911
32	13,620654	18,917863	1,390905	0,073420
34	15,445085	22,794000	1,476155	0,064746
36	17,392553	27,109377	1,561445	0,057496
38	19,464485	31,985856	1,646111	0,051376
40	21,662304	37,426659	1,730882	0,046163

droite, passant *presque* par l'origine des coordonnées. Ce petit écart provient du choix de nos coefficients, empruntés à des formules empiriques, dont les éléments ont été rassemblés par différents expérimentateurs et qui, malgré leur hétérogénéité, se combinent suffisamment pour mettre la loi en lumière. Nous pourrons sans trop d'erreur exprimer t par $A\ V$, dans lequel A est un coefficient moyen tiré des différentes valeurs de t prises dans le tableau, soit $t = 0{,}044\ V$. Divisant t par V nous aurons la résistance ou l'effort à exercer par kilogr. de poids. Nous voyons que c'est une constante ; il en résulte que pour un aéroplane, se déplaçant horizontalement dans les conditions de l'angle correspondant

au minimum de travail, l'effort nécessaire pour la propulsion se trouve en quelque sorte exprimé par une fraction du poids de l'appareil.

Si on considère les courbes qui expriment T, P, en fonction de V, on trouve que, pour les petites valeurs de V (jusqu'à 5 m. environ), les valeurs de P et de T sont extrêmement petites, c'est-à-dire que le travail dépensé est minime, mais aussi que le poids supporté par mètre carré est très faible ; en revanche, la courbe des S nous montre que, dans ces mêmes conditions de vitesse, les surfaces nécessaires, pour supporter un kilogr. de poids, sont extrêmement considérables. Il en résulte qu'un aéroplane, construit pour ces conditions de très petites vitesses, devrait avoir un très petit poids et une très grande surface, (ce qui devient difficile à réaliser en pratique). Ces conditions se rencontrent souvent dans la nature chez les insectes. Nous voyons ensuite que plus la vitesse du vol augmente, plus croît aussi la force de sustention, et, par contre, diminue la surface de l'aéroplane : nous pouvons donc en conclure que les aéroplanes, à petite voilure relative, doivent, pour se maintenir en l'air, avancer rapidement, tandis que ceux à grande voilure peuvent se soutenir en avançant avec une vitesse relativement moins grande. Nous remarquons aussi que plus la voilure d'un aéroplane est petite et par conséquent sa vitesse d'avancement plus grande, plus puissant aussi doit être son propulseur.

Telles sont les principales déductions qu'on peut faire de l'examen des lois établies par nous pour la détermination des éléments du vol horizontal d'un aéroplane ; ces lois sont toutes entières exprimées par les quatre équations déduites et représentées graphiquement par les quatre courbes de la planche II.

Il est encore une question importante dans l'étude des aéroplanes ; c'est celle de l'équilibre.

L'équilibre transversal, à la direction du mouvement, peut s'obtenir automatiquement en donnant, aux deux moitiés de l'aéroplane (symétriques par rapport à son axe longitudinal),

une certaine inclinaison, de façon à ce que les bords extérieurs se trouvent un peu plus hauts que l'axe de l'appareil. Il est facile de comprendre que si un aéroplane, construit dans ces conditions, venait pour une cause quelconque à s'incliner sur le côté, le plan sustenteur, de ce côté, aurait une projection plus grande sur l'horizontale que la face opposée, et donnerait une sustention plus grande de ce même côté, ce qui rétablirait l'équilibre. On voit un exemple frappant de ce dispositif chez les oiseaux grands planeurs, dont les ailes sont légèrement relevées de façon à former un angle dièdre, dont l'arête passe par l'axe de l'oiseau.

L'équilibre longitudinal paraît, à première vue, plus difficile à garder, mais en étudiant la question, on voit que les lois de la résistance de l'air donnent elles-mêmes le moyen de résoudre ce problème.

Avanzani, ainsi que d'autres observateurs, avait remarqué que la position du centre de pression d'un fluide, pour un plan incliné se mouvant dans ce fluide, dépendait de l'angle d'incidence sous lequel le plan rencontrait les filets fluides. Joëssel, le premier (1), nous a donné les lois exactes de ce déplacement du centre de pression en fonction de l'angle. (*Fig. 8*).

En exposant un plan AB, de forme carrée, à un courant frappant normalement cette surface, le centre de pression coïncide évidemment avec le centre de figure H du plan ; mais à mesure que le plan, tournant autour d'un de ses côtés, fait, avec la direction du courant, des angles α de plus en plus petits, le centre de pression se déplace et se rapproche de l'arête autour de laquelle le plan a tourné ; sa position limitée, pour un angle infiniment petit, se trouve à $1/5$ de la longueur L du plan. Pour déterminer les différentes positions de ce centre de pression pour les différents angles d'attaque, Joëssel nous donne la règle suivante basée sur les résultats de ses nombreuses expériences :

Sur la ligne BA, dont la longueur est L et qui représente la projection horizontale d'un plan carré, à partir de l'arête B, autour de laquelle tourne le plan, on prend une longueur égale à $0,3$ de L et sur cette longueur, comme diamètre on

(1) Mémorial du Génie Maritime, 1870. Expériences de M. Joëssel.

décrit un demi-cercle ; aux points d'intersection de ce demi-cercle avec les lignes BA_1, BA_2, BA_3,... BA_0, qui représentent les positions consécutives du plan, on porte sur ces lignes, vers l'extérieur, une longueur égale à *0,2* de *L*. On

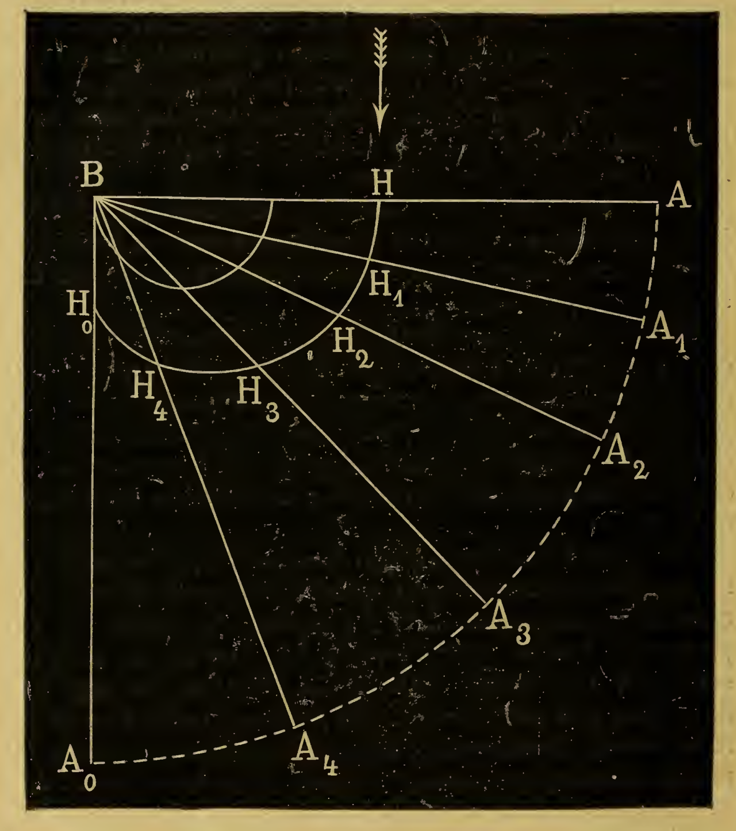


Figure 8.

obtient ainsi une courbe $HH_1\ H_2 \ldots\ H_0$, dont l'intersection, avec une position quelconque du plan, détermine le centre de pression du plan, recevant le choc du fluide sous l'incidence correspondante.

Cette courbe, on le voit, est le limaçon de Pascal, dont l'équation polaire sera :

$$\rho = (0{,}2 + 0{,}3\ Sin\ \alpha)\ L \quad ;$$

La loi, déterminée par Joëssel, nous donne la clef de l'équilibre longitudinal automatique des volateurs aéroplanes. En effet, un aéroplane, qui se meut horizontalement dans l'air, se trouve en équilibre dynamique longitudinal, lorsque les centres de gravité et de pression du système se trouvent sur une même verticale ; c'est à ces deux points *C*, *G*, que sont appliquées les deux forces égales et contraires, *R'* de sustention et *P* de la pesanteur. Si, pour une raison quelconque, l'angle α venait à augmenter ou à diminuer, le centre de pression reculerait ou avancerait et la sustention, appliquée à ce centre, formerait avec la pesanteur, appliquée en *G*, un couple qui ramènerait le point *C* sur la verticale passant par *G*, ce qui maintiendrait l'angle α constant (*Fig. 9*).

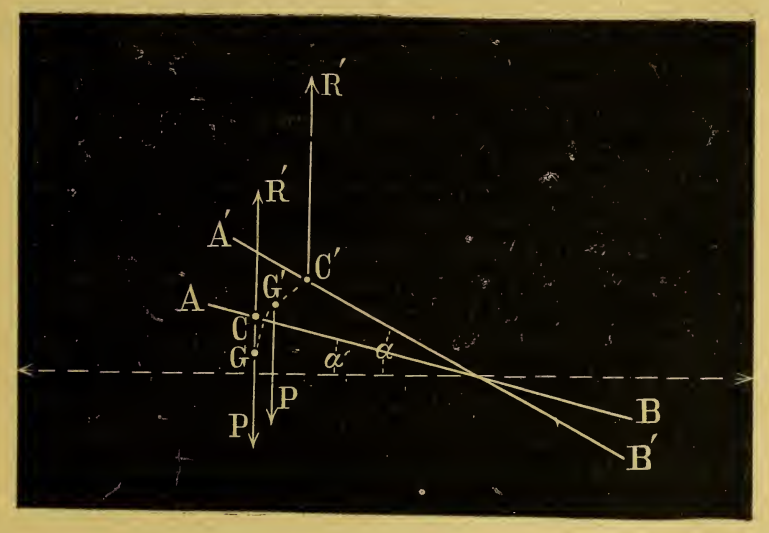


Figure 9.

La position des deux centres doit évidemment être telle que *G* se trouve un peu au-dessous de *C*, mais la distance, entre ces deux points, doit être très petite ; car, si le centre de gravité se trouvait beaucoup au-dessous du centre de sustention *C*, à chaque déplacement du centre de gravité par rapport à la verticale passant par le centre de pression, il se produirait un balancement pendulaire d'autant plus grand que la distance des deux points serait plus grande. On peut

observer un phénomène de ce genre sur un oiseau, dont les pattes blessées, par un coup de fusil, pendraient au-dessous du corps de l'oiseau et abaisseraient son centre de gravité.

Le déplacement latéral du centre de gravité, par rapport au centre de pression dans un aéroplane, entraînerait nécessairement la giration de l'appareil du côté vers lequel s'est déplacé le centre de gravité. La sustention ne se faisant plus dans un plan vertical il s'en suivra nécessairement une déviation latérale.

Nous allons examiner actuellement à quel point les lois, déduites théoriquement pour les aéroplanes, se trouvent vérifiées par l'observation des volateurs naturels, c'est-à-dire à quel point nous avons le droit de considérer l'oiseau comme un aéroplane animé.

Il est bien entendu que nous ne considérons que le vol normal de l'oiseau, c'est-à-dire sa translation horizontale, dans les conditions les plus avantageuses de rendement de son moteur à sa vitesse optima.

Nous avons vu plus haut comment l'aile d'un oiseau pouvait être assimilée à un aéroplane mobile qui soutiendrait l'oiseau, tant pendant l'abaissement que pendant le relèvement, en attaquant le vent relatif sous un très petit angle. (*Fig. 3 et 4.*)

En appliquant les résultats des calculs obtenus pour les aéroplanes à la détermination de la sustention obtenue par les ailes de la buse, que nous avons prise comme exemple au commencement de ce travail, dans les mêmes conditions de surfaces et vitesses, nous trouvons pour les ailes seules, une sustention de plus d'un kilogramme, sans compter la sustention obtenue par le corps et la queue de l'oiseau, dont les surfaces sont considérables par rapport à celles des ailes : tandis que par le calcul, appliqué à la théorie orthoptère, nous n'avions trouvé que *184* grammes.

La surface inférieure du corps de l'oiseau et sa queue sont un puissant auxiliaire pour la sustention. Chez certains oiseaux, cette surface atteint, presque comme dimension, celle de l'aile ; aussi, dans la détermination de la surface portante,

nous nous sommes toujours servis des mesures données par M. Mouillard, qui, pour un grand nombre d'oiseaux, a calculé la projection de toute la surface, aile, corps et queue, qu'il appelle l'ombre de l'oiseau ; cette méthode est beaucoup plus rigoureuse que celle des observateurs qui n'ont mesuré que la surface des ailes seulement, chez l'oiseau ; le corps et la queue jouent le rôle d'aéroplane fixe, les ailes celui d'aéroplane mobile.



Figure 10.

Nous avons vu aussi, en traitant des aéroplanes, que tout le travail était dépensé à la propulsion et que la sustention s'obtenait pour ainsi dire incidemment.

Etudions comment cette propulsion s'effectue chez les oiseaux. En examinant les positions de l'aile, pendant son abaissement, nous avons vu qu'une des composantes de la résistance agissait dans le sens horizontal d'arrière en avant ; mais, avec des angles d'incidence aussi petits que ceux que nous donne le calcul et l'observation directe, cette composante ne serait pas suffisante pour donner à l'oiseau sa propulsion ; on peut s'en convaincre aussi en la calculant. Quel est donc le véritable propulseur de l'oiseau ? Ce propulseur se trouve dans l'extrémité flexible et élastique des pennes rigides (remiges) de l'aile : lors de l'asasement de l'aile ces extrémités se relèvent plus ou moins, suivant la résistance qu'elles rencontrent et déterminent une composante horizontale, égale à la somme des efforts nécessaires pour produire cette flexion. Les extrémités des pennes se compor-


Figure 11.

tent comme les éléments d'une véritable hélice flexible dont le pas varie avec les vitesses. Les rendements de ces hélices s'adaptant automatiquement aux différentes vitesses, sont très bons, même dans l'eau, à fortiori dans un milieu élastique. (*Fig. 10* et *11*). Chez certains oiseaux les pennes, se trouvant imbriquetées les unes sur les autres, forment une surface élastique continue ; chez d'autres, les remiges sont séparées et forment par leurs barbes autant d'hélices distinctes.

Il est facile de vérifier par une expérience directe que la propulsion est due à l'élasticité de la surface.

En suspendant, par un fil, un morceau de bois, représentant le corps d'un oiseau, et muni de palettes inclinées mais rigides, représentant ses ailes, on voit que, lorsqu'on fait brusquement rabattre ces ailes de haut en bas, au moyen d'un tendeur en caoutchouc, il ne se produit aucun effet de propulsion ; tandis que si l'on remplace ces ailes par d'autres, de mêmes dimensions, pas inclinées mais dont l'arête postérieure est flexible, on voit, dans des conditions de battement identiques aux premières, une puissante propulsion se manifester. On sait aussi que, chez un oiseau, l'ablation de son propulseur, représentée dans la fig. 10 par la zone *A B*, lui enlève la possibilité de voler.



Figure 12.

L'aile, en arrivant au point le plus bas de sa course au moment où elle va se relever, change brusquement de plan (*fig. 12*). Ce changement, on le comprend facilement, produit un surcroît brusque de propulsion et donne à l'oiseau une vigoureuse impulsion jusqu'au coup d'aile suivant.

L'aile présente donc à la fois un appareil de sustention et

de propulsion, et c'est uniquement pour la propulsion que s'effectuent les battements qui seraient inutiles pour la sustention. Si ces organes étaient séparés, cela compliquerait trop l'organisme, car l'appareil de sustention, devant être variable de surface et ployable, pour le temps que l'oiseau passe à terre, exigerait aussi une paire d'ailes séparée. La nature a réuni ces deux organes en un seul, merveilleux de simplicité. Certains insectes (*coléoptères*) sont munis de deux paires d'ailes, les élytres jouant le rôle d'aéroplanes et les ailes membraneuses de propulseurs.

L'examen de l'aile de l'oiseau peut nous donner l'indication de son genre de vol : ainsi les ailes longues, étroites et par conséquent de petite surface portante, dont toute la partie postérieure consiste en plumes courtes et raides, comme chez l'albatros par exemple, indique un très puissant moteur qui, avec une petite voilure, permet à l'oiseau de se jouer de la tempête ; tandis que les ailes relativement courtes et larges des planeurs, comme l'aigle ou l'alouette par exemple, permettent un vol lent et prolongé dans un temps relativement calme : ce genre d'oiseau est incapable de lutter contre un vent fort.

Chez les oiseaux, ainsi que nous l'avons démontré pour les aéroplanes, la vitesse du vol est en relation directe avec le poids relatif porté. Nous appelons poids relatif, le poids total de l'oiseau par rapport à la surface totale. La loi des aéroplanes nous montre que les petits poids, portés pour des grandes surfaces, peuvent seuls voler lentement, avec une dépense minime de travail ; tandis que les aéroplanes lourds, portés par des petites voilures, ne peuvent se soutenir qu'à la condition d'avancer avec une grande vitesse.

L'observation de la nature vérifie pleinement cette loi. En jetant un coup d'œil sur notre tableau graphique, qui représente les quatre lois de l'aviation *(Pl. II)*, nous voyons que les petits poids, le petit travail, les grandes surfaces, correspondent aux petites vitesses. C'est dans cette partie du tableau que peuvent être rangés les insectes, dont les voilures, par kilogramme de poids supporté, sont de dix mètres environ, ce qui correspondrait à des vitesses d'avancement entre *2* et *4* mètres ; en effet, ce sont là les vitesses de la plupart des insectes. Plus loin, à mesure que les surfaces portantes

diminuent, la vitesse nécessaire augmente ; c'est vers *1*m de surface par kilog. porté, que commencent à se ranger les oiseaux ; ceci correspond à une vitesse de *8* mètres d'avancement ; c'est bien la vitesse minima que peuvent atteindre les oiseaux à plus grande voilure, en vol normal. En rangeant les oiseaux. mesurés et pesés par M. Mouillard, par ordre de leur poids relatif augmentant, ils se trouvent naturellement placés dans l'ordre de vitesse croissante de leur vol normal (*Tableau D*). Ils occuperaient, dans le tableau graphique, la zône verticale comprise entre les ordonnées correspondantes à *8* mètres et *30* mètres. Dans cette zône, toutes les conditions du vol nous sont données par le graphique.

Tableau D.

Nos	NOMS DES ESPÈCES.	S	P
1	Nyctinomus aegypticus........	1,568	0,637
2	Upupa epops..................	0,744	1,291
3	Cotile rupestris...............	0,744	1,291
4	Budytes flava..................	0,695	1,438
5	Galerita cristata..............	0,652	1,533
6	Caprimulgus..................	0,650	1,538
7	Galerita cristata...............	0,628	1,592
8	Accipiter nisus...............	0,614	1,631
9	Pteropus Geoffroyi...........	0,572	1,718
10	Coracias garrulus.............	0,566	1,766
11	Tringa canutus...............	0,541	1,848
12	Falco tinnunculus............	0,508	1,968
13	Passer domesticus............	0,496	2.016
14	Vanellus cristatus............	0,494	2,024
15	Passer domesticus............	0,484	2,066
16	Cypselus apus................	0,482	2,073
17	Larus melanocephalus I.......	0,481	2,079
18	Glareola torquata.............	0,476	2,097
19	Larus melanocephalus II......	0,471	2,123
20	Turtur aegypticus.............	0,466	2,133
21	Otus brachyotus..............	0,463	2,156
22	Strix flammea................	0,462	2,160
23	Milvus aegypticus.............	0,449	2,226
24	Petrocincla cyanea............	0,446	2,242
25	Alcedo hispida I..............	0,433	2,309
26	id. II.............	0,432	2,314

Tableau D (*suite*).

Nos	NOMS DES ESPÈCES.	S	P
27	Buphus minutus..............	0,413	2,421
28	Scolopax gallinula............	0,401	2,493
29	Ephialtes zorca...............	0,389	2,570
30	Alcedo hispida................	0,384	2,604
31	Corvus aegypticus............	0,356	2,809
32	Astur palumbarius............	0,355	2,816
33	Ibis falcinellus................	0,341	2,932
34	Sturnus vulgaris.............	0,339	2,943
35	Scolopax capensis	0,338	2,949
36	Corvus corax..................	0,332	3,012
37	Scolopax gallinula............	0,328	3,046
38	Philomachus pugnax..........	0,302	3,311
39	Ardea nycticorax	0,294	3,401
40	Ciconia alba...................	0,287	3,499
41	Charadrius pluvialis	0,284	3,521
42	Columba aegyptica............	0,281	3,558
43	Falco peregrinus..............	0,265	3,773
44	Rallus aquaticus..............	0,263	3,802
45	Pandion fluvialis..............	0,259	3,858
46	Neophron percnopterus	0,242	4,132
47	Columba aegyptica	0,232	4,310
48	Numenius arquatus...........	0,227	4,405
49	Ortyx coturnix	0,222	4,494
50	Recurvirostra avocetta........	0,216	4,619
51	Oedicnomus crepitans	0,190	5,263
52	Anas querquedula	0,177	5,649
53	Puffinus Kulhi.................	0,175	5,714
54	Gallinula chloropus...........	0,157	6,410
55	Numenius arquatus...........	0,156	6,410
56	Pelecanus anocrotales.........	0,150	6,634
57	Gyps fulvus	6,139	7,180
58	Otogyps auricularis...........	0,136	7,323
59	Pterocles exustus	0,136	7,323
60	Procellaria gigantea............	0,131	7,616
61	Anser sylvestris................	0,120	8,333
62	Meleagris Gallopavo	0,107	9,345
63	Anas clypeata.................	0,102	9,750
64	Id. mâle.....................	0,090	11,050

Lorsqu'un oiseau à grande voilure relative, comme l'hirondelle par exemple, qui, toutes voiles dehors, peut voler avec une vitesse minima de *10* mètres environ, veut voler plus vite, il ramène ses ailes en forme d'*M* et ferme sa queue ; ayant alors une surface moindre, par rapport à son poids, il se

trouve dans des conditions de volateurs à moindre voilure, par conséquent forcés de voler plus vite pour se soutenir ; il est évident que, dans ces nouvelles conditions, il dépensera plus de travail que dans le premier cas.

L'examen de notre tableau graphique nous amène encore à d'autres considérations. L'expression du travail par kilogramme du volateur, étant proportionnelle à la vitesse nécessaire optima, nous voyons que les petits oiseaux, munis de grandes voilures, auront besoin de moteurs plus faibles (par kilog. porté) que les grands oiseaux à plus petite voilure, qui se trouvent à la fin de la liste ; et comme le poids des muscles pectoraux, par rapport au poids total, ne suit pas tout à fait cette proportion, il s'en suit que les petits oiseaux se trouvent dans des conditions plus favorables pour le vol, ce qui explique la facilité qu'ils ont à exécuter ces acrobaties qui nous étonnent si souvent. Pour que tous les oiseaux soient placés dans les mêmes conditions de moteur, il faudrait que le poids de leurs muscles pectoraux, par rapport au poids total, croisse en proportion de la vitesse nécessaire ; ou bien encore, que le rapport des poids restant constant, la puissance de ces muscles croisse dans cette même proportion. Les deux conditions pourraient aussi être réunies et nous croyons que dans la nature, elles le sont probablement. Les muscles des grands oiseaux seraient un peu plus puissants (à poids égal) et constitueraient en même temps une plus grande fraction du poids total, que chez les petits oiseaux. Si l'on prend une moyenne, on trouve que *1/6* du poids total de l'oiseau, représentant le poids des muscles pectoraux, le kilog. de muscles produirait un travail moyen de *5* à *6* kilogrammètres, ce qui, pour un cheval-vapeur, correspondrait à un poids de *15* kilog. environ. Ces chiffres concordent parfaitement avec l'observation et montrent que le muscle de l'oiseau n'est guère plus puissant que le muscle moteur d'un autre animal quelconque. L'auteur hollandais, Harting, avait cru trouver un rapport constant entre la racine cubique du poids des oiseaux et la racine carrée de leur surface ; cette soi-disant constance, car elle varie de *2* à *5*, pourrait s'expliquer par la considération que la variation du poids, à la surface des oiseaux considérés, n'est elle-même pas très considérable, à plus forte raison celle du rapport de la racine cubique de l'une à la racine carrée de l'autre.

Les oiseaux à l'essor, lorsqu'ils ne se laissent pas tomber d'un point élevé pour gagner de la vitesse, mais lorsqu'ils partent de terre, dépensent évidemment un travail plus grand que dans le vol normal. Pour partir, on les voit courir ou sauter en s'aidant de leurs ailes comme propulseur, jusqu'au moment où ils arrivent à atteindre une vitesse suffisante pour quitter le sol ; mais cette vitesse est encore inférieure à leur vitesse normale, aussi sont-ils obligés d'augmenter leur angle d'incidence en relevant la partie antérieure de leur corps, et de déployer leur voilure d'ailes et de queue autant que cela leur est possible ; on voit alors souvent les pennes des ailes et de la queue se séparer pour augmenter la surface, les battements des ailes sont plus fréquents et leur amplitude est beaucoup plus grande, jusqu'au moment où la vitesse normale est atteinte, alors seulement la queue se referme et les ailes reprennent leur surface et leur battement normal. Pour se poser, l'oiseau a recours à la même augmentation de surface et d'angle d'incidence ; il étale sa queue et, au moyen de ses ailes très étendues, attaquant l'air sous une grande incidence, il diminue sa vitesse d'avancement et amortit sa chute. La queue sert à l'oiseau de voile supplémentaire qu'il ne déploie que lorsqu'il a besoin de diminuer la vitesse.

Le changement de direction de l'oiseau s'obtient par le déplacement du centre de pression, par rapport à son centre de gravité ; pour cela, l'oiseau, qui veut tourner, ramène un peu l'une de ses ailes, ce qui rapporte le centre de pression du côté opposé qui se relève alors, et l'oiseau tourne du côté de l'aile ramenée. L'oiseau qui désire s'élever ou s'abaisser, en avançant ses ailes ou en les ramenant un peu, déplace son centre de pression par rapport au centre de gravité et augmente ou diminue son angle d'attaque. Afin de faciliter le reploiement complet des ailes chez l'oiseau qui se pose, les pennes sont munies de petits muscles, qui, automatiquement, les font un peu tourner comme les lattes d'une jalousie, de façon à ce qu'elles ne se froissent pas ; car les barbes de ces pennes sont le précieux organe qui sert à l'oiseau pour la propulsion.

On peut dire, en concluant, que tout le problème du vol et les manœuvres si variées de l'oiseau se trouvent simplement expliquées, en appliquant à leur étude les lois déduites pour

les aéroplanes et en considérant l'oiseau comme un aéroplane animé.

Cette manière de voir est d'autant plus séduisante qu'elle nous donne, pour ainsi dire, la clef du problème à résoudre pour l'aviation. En effet, les chiffres, que nous donne notre théorie, comme rapport des surfaces, vitesses, travail au poids soulevé, sont très abordables pour l'homme ; nous possédons des moteurs trois fois plus légers que ceux des oiseaux. Il ne nous manquait que la compréhension du phénomène. Si notre conception du vol est juste, le problème de l'aviation est résolu.

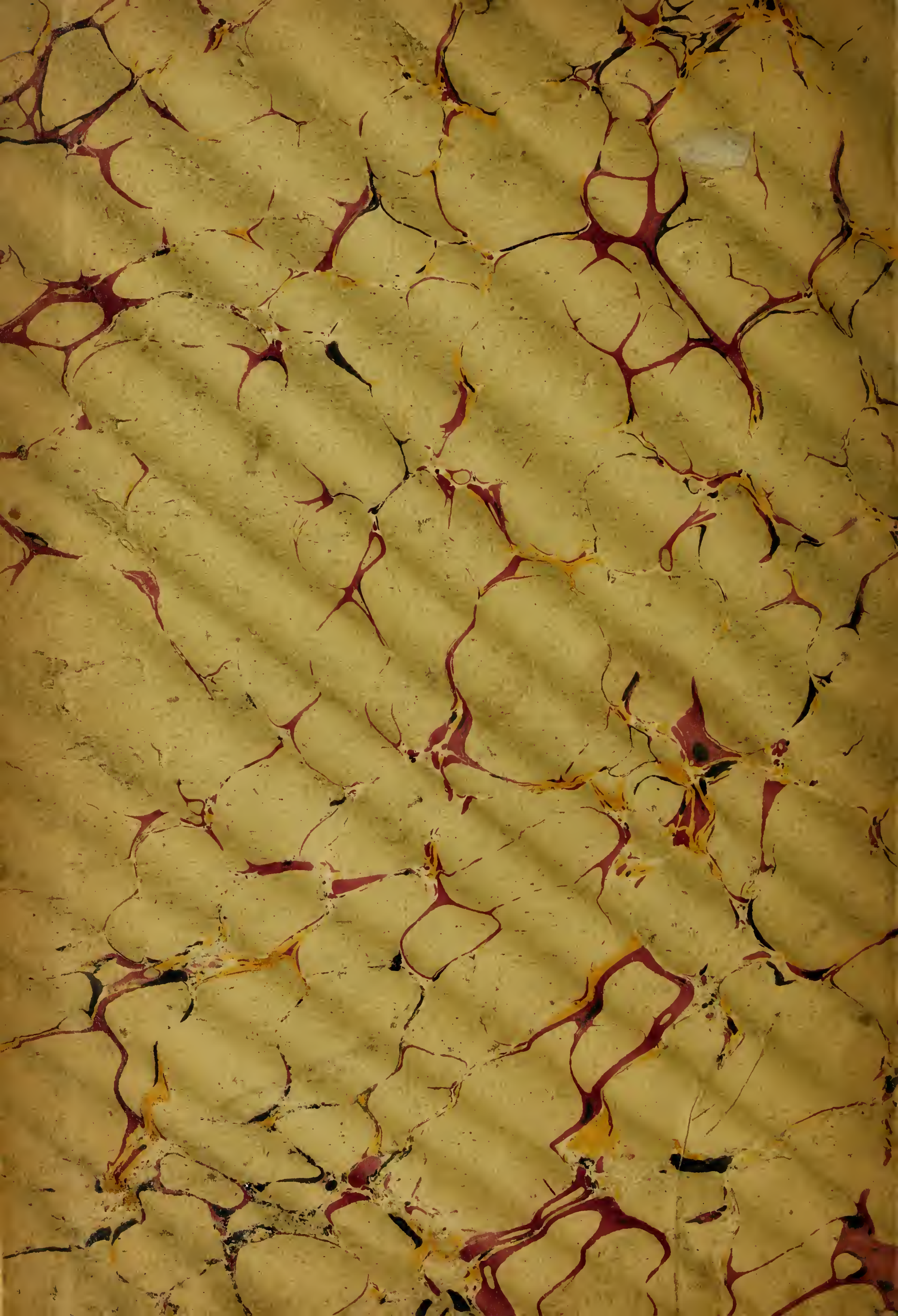
S. DRZEWIECKI.

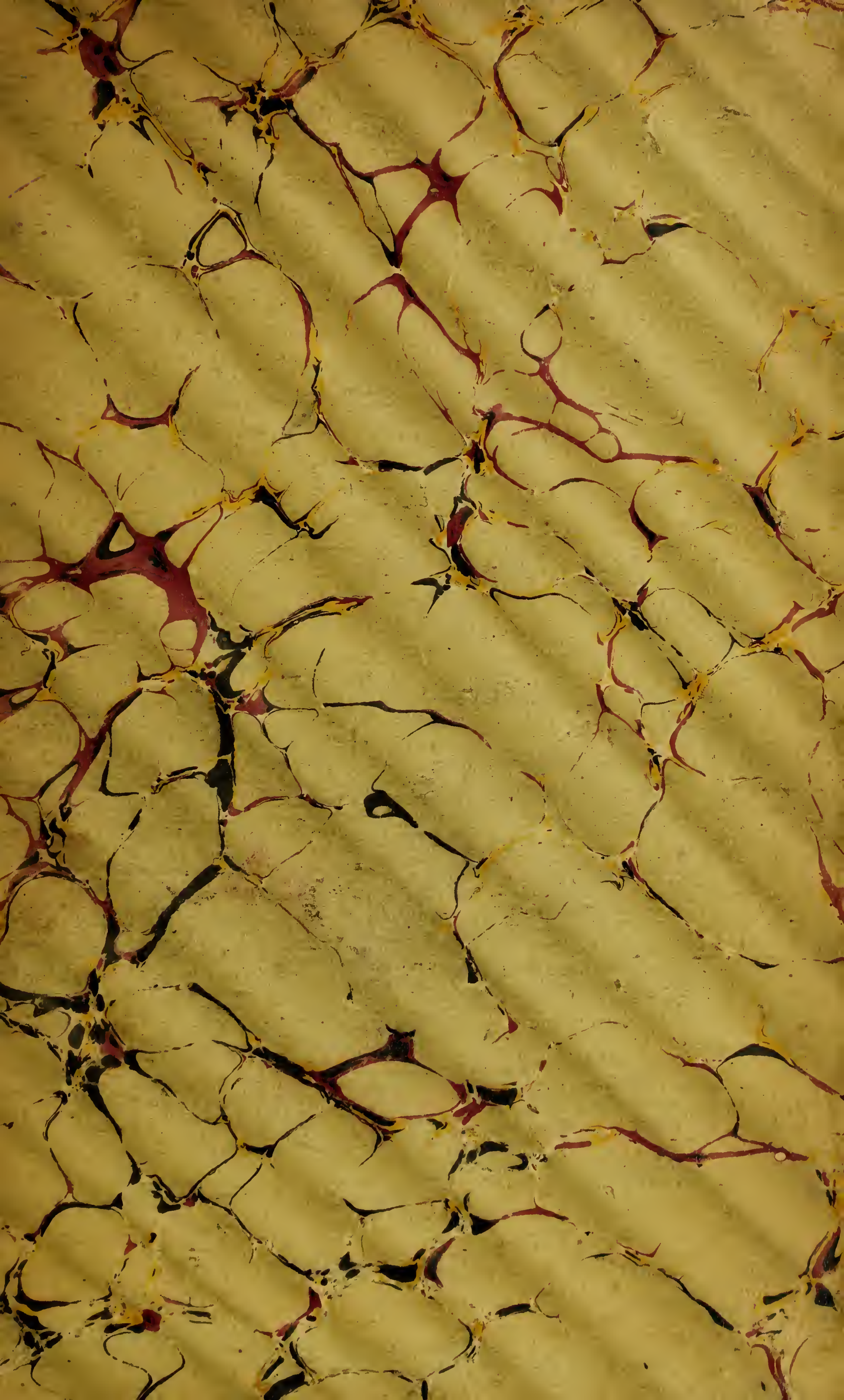
Paris, 1889.

16, Cité d'Antin.



Clermont (Oise). — Imprimerie Daix frères, place Saint-André, 3.






UNIVERSITY OF ILLINOIS-URBANA
3 0112 069893763